کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی هیسترسیس با استفاده از میراگر جرمی چندگانه‌ی بهینه★

محتشم محبی[۱] حسین شعبانی[۲] سولماز مرادپور[۳]

چکیده *در این پژوهش به بررسی کارآیی میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه (MTMD) در کاهش ارتعاشات سازه‌های غیرخطی هیسترسیس پرداخته شده است که پارامترهای بهینه‌ی MTMD براساس کمینه کردن بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی تعیین شده است. برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. برای آنالیز عددی، قاب برشی ۸ طبقه با منحنی هیسترسیس دوخطی تحت ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و به طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده مؤثر بودن روش پیشنهادی را در طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی نشان می‌دهد. هم‌چنین می‌توان گفت که MTMD در صورت طراحی بهینه می‌تواند خرابی را در سازه‌های غیرخطی کاهش دهد که میزان کاهش وابسته به مشخصات زلزله‌ی ورودی و درصد جرمی می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده، میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه، قاب برشی غیرخطی، بهینه‌سازی.

Reducing the Seismic Response of Nonlinear Hysteretic Structures Using Optimal Multiple Tuned Mass Dampers

M. Mohebbi H. Shabani S. Moradpour

Abstract *In this research, the effectiveness of multiple tuned mass dampers (MTMDs) in mitigating the response of nonlinear hysteretic structures has been studied where the optimal parameters of MTMDs have been determined based on minimization of maximum relative displacement (drift) of structure. For solving the optimization problem the genetic algorithm (GA) has been used successfully. For numerical analysis, an eight-storey bilinear hysteretic shear frame subjected to a white noise excitation and optimal MTMDs have been designed. The results of numerical simulations have shown the effectiveness of the proposed method in designing optimal MTMDs for nonlinear structures. Also, it can be said that the damage of structure can be reduced using optimal MTMDs where the performance has been affected by earthquake characteristics and mass ratio.*

Keywords Passive Control, Tuned Mass Damper (TMD), Multiple Tuned Mass Dampers (MTMDs), Nonlinear Shear Frame, Optimization.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۸/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۳/۲۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی فنی و مهندسی ، دانشگاه محقق اردبیلی.

(۲) کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

(۳) کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

مقدمه

استفاده از سیستم های کنترل سازه یکی از فن‌آوری‌های نسبتاً جدید در زمینه‌ی طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد و بررسی‌های زیادی در مورد عملکرد سیستم‌های کنترل سازه‌ها انجام گرفته است [1]. میراگر جرمی تنظیم شده (Tuned Mass Damper-TMD) یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال انرژی است که این وسیله با جذب کردن مقداری از انرژی وارد شده از بار دینامیکی به سازه، میزان تقاضا برای استهلاک انرژی را در سازه‌ی اصلی کاهش می‌دهد [2]. ساده‌ترین جرم میراگر هماهنگ شده، سیستمی شامل جرم، فنر و میراگر ویسکوز است که به سازه‌ی اصلی اضافه می‌گردد. سرآغاز طرح این میراگرها بر پایه‌ی مطالعاتی است که بر روی ضربه‌گیرهای ارتعاشات دینامیکی توسط فراهم انجام شده است که نتایج آن در سال۱۹۰۹ منتشر گردید [3]. بیشاپ و ولبورن مسأله‌ی ضربه‌گیرهای ارتعاشی را با در نظر گرفتن اثر وجود میرایی در سازه‌ی اصلی مورد بحث قرار دادند [4]. در سال ۱۹٦۷، فالکون و همکاران به طرح مسأله‌ی بهینه‌سازی پارامترهای جرم میراگر پرداختند [5]. طراحی میراگر جرمی هماهنگ‌شده با فرض رفتار غیرخطی سازه‌ها هم مورد مطالعه قرار گرفته است. کی نیا و همکارانش در سال ۱۹۸۱ یک بررسی مقدماتی بر روی تأثیر لرزه‌ای TMD در سازه‌های یک درجه آزادی با رفتار الاستو–پلاستیک تحت یک مجموعه از زلزله‌های ثبت شده در ناحیه‌ی غربی ایالات متحده انجام دادند که نتایج به‌دست آمده نشان دهنده‌ی کاهش اندکی در ماکزیمم جابه‌جایی سازه می‌باشد [6]. برنال در سال ۱۹۹٦ رفتار سازه‌های یک درجه آزادی غیرارتجاعی مجهز به جرم میراگر هماهنگ‌شده را تحت زلزله‌ی ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی که از نوع زلزله‌های باند باریک با طول مدت بلند است، مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که کاهش در جابه‌جایی ماکزیمم سازه با افزیش یافتن شدت رفتار غیرارتجاعی سازه کاهش می‌یابد [7]. جغتایی و محبی نحوه‌ی تعیین پارامترهای بهینه‌ی TMD برای سازه‌های غیرخطی با رفتار برشی را مورد بررسی قرار دادند [8]. میراگر جرمی تنظیم شده در صورتی‌که به‌درستی تنظیم شود، می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای ارتعاشات لرزه‌ای یک سازه را کاهش دهد. با این‌حال یک TMD منفرد، به‌علت حساسیت بالای آن به تنظیم نشدن فرکانس‌ها یا تفاوت نسبت میرایی میراگر، ممکن است در کاربرد واقعی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کارایی خود را از دست بدهد [9]. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که میراگر منفرد حتی ممکن است پاسخ مودهای بالاتر را در اثر هم‌زمانی بین مود اصلی و مودهای بالاتر تقویت کند [10]. با توجه به مطالعات انجام گرفته در مورد میراگر جرمی تنظیم شده، عملکرد لرزه‌ای TMD تنها زیاد قابل اعتماد نیست.

برای رفع محدودیت‌های مکانیزم‌های کنترل غیرفعال در سال‌های اخیر سیستم‌های کنترل فعال پیشنهاد شده است که شامل مکانیزم‌های مختلفی نظیر تاندون فعال، میراگر جرمی فعال، میراگر ستون مایع فعال، .... می‌باشد [11,12]. در سیستم‌های کنترل فعال با اندازه‌گیری پاسخ سازه و ارتعاش خارجی در هر لحظه و براساس قانون کنترل، نیروهایی در نقاط مختلف سازه از طریق محرک‌ها به‌منظور کاهش پاسخ سازه وارد می‌شود. برای کنترل فعال سازه‌های خطی و غیرخطی الگوریتم‌های مختلفی پیشنهاد شده و کارایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است [13,14]. میراگرهای جرمی فعال که ترکیب میراگر جرمی هماهنگ‌شده با یک سیستم کنترل فعال هستند به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های کنترل فعال در سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند [١٦و15]. از مزیت‌های عمده‌ی میراگرهای جرمی فعال نسبت به حالت غیرفعال می‌توان به قابل استفاده بودن حتی در صورت عدم تنظیم مناسب پارامترها و قابلیت عملکرد مناسب برای دامنه‌های فرکانسی بیشتر اشاره کرد. مطالعات زیادی بر روی سیستم ATMD انجام شده است که می‌توان به استفاده از ATMD برای ساختمان‌های بلند تحت تحریک باد [17]، بهینه کردن پارامترهای ATMD برای

ساختمان‌ها تحت تحریک باد [18]، استفاده از قانون کنترل فیدبک جابه‌جایی بهینه برای طراحی ATMD [19] و ارزیابی معیارهای مختلف نظیر موقعیت میراگر تا مرکز جرم، فرکانس، نسبت میرایی ومینیمم کردن جابه‌جایی انتقالی و پیچشی برای بهینه کردن پارامترهای ATMD در کاهش پاسخ سازه‌های نامتقارن [20] اشاره کرد. عیب عمده‌ی این مکانیزم نیاز آن به یک منبع بزرگ انرژی خارجی می‌باشد که ممکن است به‌هنگام زلزله در دسترس نباشد. روش دیگر برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال نظیر میراگر جرمی هماهنگ‌شده‌ی نیمه‌فعال با میرایی یا سختی متغییر [21]؛ میراگر مگنتورئولوژیک(MR)[22,23] می‌باشد. در این مکانیزم‌ها، مشخصات سیستم نظیر میرایی یا سختی در هر لحظه براساس قانون کنترل تعیین می‌شود.

برای بهبود عملکرد مکانیزم TMD تنها، گزینه‌ی دیگر کاربرد میراگرهای جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه(MTMD) می‌باشد که توسط Xu و Igusa پیشنهاد شد [24]. MTMD متشکل از چندین جرم میراگر تنظیم شده‌ی منفرد می‌باشند که این میراگرها می‌توانند به دو صورت موازی و سری طراحی و در سازه نصب شوند [25]. بررسی‌ها نشان می‌دهد کارکرد MTMD به مقدار جرم، تعداد TMDها و دامنه‌ی فرکانسی طراحی و نحوه‌ی توزیع آن‌ها بستگی دارد [26]. میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه MTMD برای مودهای مختلف قابل‌تنظیم می‌باشد که به‌منظور افزایش کارآیی لرزه‌ای، میراگرها در موقعیت مکانی مختلف کار گذاشته می‌شوند. چنین سیستم‌هایی علاوه بر بهبود کارآیی، اغلب نیازمند یک فضای اختصاصی داده شده برای قرار دادن میراگرهای کوچک نمی‌باشند. با توجه به سبکی وزن این میراگرها استفاده‌ی نادرست از هر جرم میراگر تنظیم شده باعث اثرات مضر در پاسخ سازه نخواهند شد. علاوه براین، کارآیی میراگرهای جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه حساسیت کمتری نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سیستم دارد.

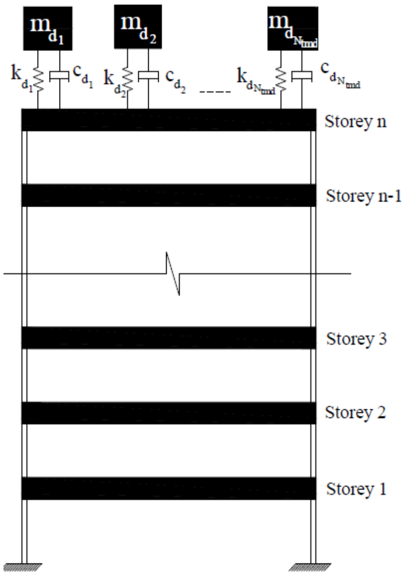
در مورد بررسی کارایی و نحوه‌ی طراحی MTMD برای سازه‌های خطی مطالعات قابل‌توجهی صورت گرفته است که می‌توان به بررسی اثر پارامترهای TMDها در کارایی MTMD در سازه‌های یک درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک با فرض جرم و نسبت میرایی یکسان برای TMDها [27]، طراحی MTMDها برای سازه‌ی یک درجه آزادی تحت نیروی باند پهن بدون در نظر گرفتن جرم و نسبت میرایی یکسان برای TMDها [28]، تعیین پارامترهای بهینه‌ی MTMDها در یک سازه‌ی نامیرا تحت تحریک هارمونیک براساس کمینه کردن تغییرمکان سازه‌ی اصلی با روش جست و جوی عددی [29] و بررسی کارایی پنج حالت مختلف سامانه MTMD با هدف کمینه کردن ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی تغییرمکان و ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی شتاب یک سازه‌ی تحت شتاب زمین به‌ازای ترکیب‌های متفاوتی از پارامترهای TMDها اشاره کرد [30]. زو و نایفه با طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی چندگانه، به این نتیجه رسیدند که در مکانیزم MTMD با وجود این‌که افزایش تعداد TMDها فقط تا تعداد مشخصی از TMD در بهبود کارایی MTMD مؤثر است، لیکن با افزایش تعداد TMDها قابلیت اعتماد و مقاوم بودن سامانه در مقابل تغییر پارامترهای سازه افزایش می‌یابد [31]. اثر موازی یا سری قرار دادن TMDها با تابع هدف کمینه‌سازی پاسخ فرکانسی سازه تحت اثر بار هارمونیک توسط Carneiro و همکاران [32] و تأثیر سیستم MTMD های توزیع شده در ارتفاع سازه‌ها توسط Moon [33] بررسی شده است. Mohebbi و همکاران روشی مبتنی بر استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای تعیین پارامترهای MTMD برای سازه‌های چند درجه آزادی خطی ارائه دادند [34]. مشابه مکانیزم میراگر جرمی فعال، جهت بهبود عملکرد MTMD تحت اثر ارتعاش زلزله، از این مکانیزم به‌صورت میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال چندگانه (AMTMD) استفاده گردیده است. سیستم AMTMD شامل تعدادی ATMD با جرم‌های کوچک‌تر می‌باشد که به‌منظور بهبود کارایی MTMD مورد استفاده قرار می‌گیرد [35-37].

اکثر تحقیقاتی که بر روی عملکرد MTMD در کاهش پاسخ ماکزیمم سازه انجام شده است، با فرض رفتار خطی سازه بوده است. با توجه به این‌که سازه‌ها در مقابل زلزله‌های شدید وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شوند لذا طراحی و بررسی عملکرد MTMD برای سازه‌های با رفتار غیرخطی حائز اهمیت می‌باشد. در سازه‌های با رفتار غیرخطی به‌دلیل متغیر بودن ماتریس سختی سازه در طول مدت ارتعاش نمی‌توان از روش‌های طراحی MTMD برای سازه‌های خطی که براساس سختی ثابت ارایه شده‌اند، استفاده نمود. در مطالعات قبلی بررسی کارایی سیستم MTMD بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی زیاد مورد توجه نبوده است، لذا در این پژوهش کارایی سیستم MTMD در سازه‌های غیرخطی تحت ارتعاش زلزله مورد بررسی قرار گرفته است که برای طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD روش ارائه شده توسط محبی و همکارانش [34] به سازه‌های با رفتار غیرخطی توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش به طراحی بهینه‌ی سیستم MTMD برای قاب‌های برشی با رفتار هیسترسیس دوخطی پرداخته شده و تأثیر عوامل مختلف مانند تعداد TMDها، درصد جرمی و رکورد زلزله‌های مختلف در کارایی MTMD در سازه‌های غیرخطی بررسی شده است.

معادله‌ی حرکت سیستم سازه– MTMD

سیستمی متشکل از سازه‌ی اصلی به‌صورت قاب برشی با n درجه آزادی با رفتار غیرخطی، تحت شتاب پایه $\ddot{X}_g$ به‌همراه تعداد N_{tmd} میراگر جرمی منفرد با مشخصات دینامیکی متفاوت را مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید که میراگرهای جرمی در طبقه‌ی آخر سازه‌ی اصلی و به‌صورت موازی نصب شده است. پارامترهای i امین TMD شامل سختی (k_{d_i})، میرایی (c_{d_i}) و جرم (m_{d_i}) است.



شکل ۱ سیستم سازه–MTMD در حالت نصب موازی TMDها [34]

معادله‌ی حرکت سیستم سازه–MTMD به شکل زیر نوشته می شود:

$$M\ddot{X}(t)+F_D(\dot{X}(t))+F_s(X(t))=Me\ddot{X}_g \quad (۱)$$

که در آن t زمان، $\ddot{X}_g$ شتاب زمین، X بردار جابه‌جایی، $\dot{X}$ بردار سرعت، $\ddot{X}$ بردار شتاب، M ماتریس جرم $(n+N_{tmd})\times(n+N_{tmd})$ بعدی، F_D بردار نیروی میرایی $(n+N_{tmd})$ بعدی، F_S بردار نیروی مقاوم $(n+N_{tmd})$ بعدی، $e=[-1,-1,...,-1]^T$ $e=[-1,-1,...,-1]^T$ بردار انتقال شتاب زمین $(n+N_{tmd})$ بعدی می‌باشد.

مقدار نیروی‌های میرایی و سختی را در هر گام زمانی می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$F_{D_k}=F_{D_{k-1}}+C^*_{k-1}\left[\dot{X}_k-\dot{X}_{k-1}\right] \quad (۲)$$

$$F_{S_k}=F_{S_{k-1}}+K^*_{k-1}\left[X_k-X_{k-1}\right] \quad (۳)$$

که k گام زمانی، K^*_{k-1} و C^*_{k-1} ماتریس سختی و ماتریس میرایی مماسی در زمان $t=(k-1)\Delta t$

می‌باشد. معادلـه‌ی (۱) را در زمـان‌هـای $t=(k-1)\Delta t$ و $t=(k)\Delta t$ می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$M\ddot{X}_{k-1}+F_{D_{k-1}}+F_{S_{k-1}}=Me\ddot{X}_{g_{k-1}} \quad (٤)$$

$$M\ddot{X}_{k}+F_{D_{k}}+F_{S_{k}}=Me\ddot{X}_{g_{k}} \quad (٥)$$

معادلـه‌ی نمـوی حرکـت در فاصلـه‌ی زمـانی $(k-1)\Delta t$ تا $(k)\Delta t$از کـم کـردن معادلـه‌ی (٤) از (٥) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$M\Delta\ddot{X}(t)+C^{*}\Delta\dot{X}(t)+K^{*}\Delta X(t)=\Delta P(t) \quad (٦)$$

$$\Delta\ddot{X}(t)=\ddot{X}_{k}-\ddot{X}_{k-1} \quad (٧)$$

$$\Delta\dot{X}(t)=\dot{X}_{k}-\dot{X}_{k-1} \quad (٨)$$

$$\Delta X(t)=X_{k}-X_{k-1} \quad (٩)$$

$$\Delta P(t)=P_{k}-P_{k-1} \quad (١٠)$$

$$P_{k}=Me\ddot{X}_{g_{k}} \quad (١١)$$

$$P_{k-1}=Me\ddot{X}_{g_{k-1}} \quad (١٢)$$

در معادله‌ی فوق، ماتریس جـرم و میرایـی ثابـت است ولی ماتریس سختی در هر لحظه تغییـر مـی‌کنـد. نحوه‌ی تشکیل ماتریس‌های C, K, M بستگی به آرایش TMDهـا در سـازه دارد. در ایـن مقالـه حالـت نصـب TMDها در طبقه‌ی آخر سازه و به‌صورت موازی مورد استفاده قرار گرفتـه اسـت. مقـدار نیروهـای میرایـی و سختی که میراگرهای جرمی به طبقه‌ی آخر سـازه وارد می‌کنند نیروهای کنترلی هستند که باعث کاهش پاسـخ سازه می‌گردند. مقدار این نیروها وابسـته بـه سـختی و میرایی میراگرها است که باید مقداری بهینه بـرای آنهـا تعیین شود که در قسمت بعدی مورد مطالعه قرار مـی-گیرد. برای حل معادله‌ی نمـوی حرکـت (معادلـه‌ی ٦) می‌توان از روش‌های عددی مختلـف اسـتفاده کـرد. در این مقاله برای آنالیز غیرخطـی از روش β–Newmark [38] استفاده شـده اسـت کـه بـرای ایـن منظـور یـک برنامه‌ی آنالیز غیرخطی در نرم‌افزار MATLAB نوشـته شده است.

برای شبیه‌سازی عددی در این مقاله در هر گـام زمانی نیاز بـه شـتاب ارتعـاش زمـین مـی‌باشـد کـه از ارتعاش اغتشـاش سـفید و رکـورد زلزلـه‌هـای واقعـی استفاده شده است. در کاربردهـای عملـی در هـر گـام زمانی نیاز به پاسخ طبقات سازه مـی‌باشـد کـه توسـط حسگرها اندازه‌گیری می‌شود.

تعیین پارامترهای بهینه‌ی MTMD بر مبنای کمینه کردن ماکزیمم تغییرمکان جانبی نسبی سازه

در این مقاله برای طراحی MTMD بهینـه، روش ارائـه شده توسط محبی و همکاران [34] کـه بـرای طراحـی این مکانیزم در سازه‌های خطـی ارائـه شـده اسـت، در جهت اسـتفاده در طراحـی MTMD بـرای سـازه‌هـای غیرخطی توسعه داده شده است. ایـن روش مبتنـی بـر تعریف یـک مسـئله‌ی بهینـه‌سـازی اسـت کـه کـاهش بیشینه‌ی پاسخ سازه به‌عنوان تـابع هـدف و پارامترهـای TMDهـا بـه‌عنـوان متغیرهـای مسـئله در نظـر گرفتـه می‌شود. تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی براساس هـدف مورد نظر از کاربرد سیستم کنترل نظیر کاهش مـاکزیمم تغییرمکان‌جـانبی، تغییرمکـان جـانبی نسـبی طبقـات و شتاب می‌تواند انتخاب شـود. در ایـن مقالـه بـه‌منظـور کاهش خرابی سـازه‌هـای غیرخطـی، کـاهش مـاکزیمم تغییرمکان جانبی نسبی طبقات سازه به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است. مسئله‌ی بهینه‌سـازی در حـالتی کـه تغییـر مکـان بیشـینه‌ی TMDهـا و پارامترهـای آن‌هـا بـه‌ترتیـب از مقـادیر حـدی X_L، $m_{d_{max}}$، $k_{d_{max}}$، $c_{d_{max}}$ تجاوز نکند به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Find: } m_{d_1},c_{d_1},k_{d_1},\ldots,m_{d_{N_{tmd}}},c_{d_{N_{tmd}}},k_{d_{N_{tmd}}} \quad (١٣)$$

Minimize:

$$Y_{max}=\max\left(\left|y_k(i)\right|,\ k=1,2,..,k_{max}\right),\quad i=1,2,..,n \quad (١٤)$$

$$\text{Subject to: } X_{max(TMD)}\le X_L \quad (١٥)$$

$$0\le m_{d_i}\le m_{d_{max}}\quad i=1,2,..,N_{tmd} \quad (١٦)$$

$$0 \le k_{d_i} \le k_{d_{max}} \quad i=1,2,..,N_{tmd} \qquad (۱۷)$$

$$0 \le c_{d_i} \le c_{d_{max}} \quad i=1,2,..,N_{tmd} \qquad (۱۸)$$

k_{max} بیشینه‌ی گام زمانی تحلیل و $y_k(i)$ تغییرمکان جانبی نسبی طبقه i ام در گام زمانی k ام می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} y_k(i) = x_k(i) - x_k(i-1) & i=2,3,\cdots,n \\ y_k(1) = x_k(1) \end{cases} \qquad (۱۹)$$

اعمال محدودیت در $m_{d_{max}}$، $k_{d_{max}}$ و $c_{d_{max}}$ عملکرد MTMD را تحت تأثیر قرار می‌دهد لذا باید مقدار مناسبی برای این پارامترها انتخاب شود. در کاربردهای عملی، این مقادیر براساس مشخصات ساخت این میراگرها تعیین می‌شود. در صورتی‌که از جرم یکسان برای همه‌ی TMDها استفاده شود در این حالت مسئله‌ی بهینه‌سازی با اعمال محدودیت نامساوی به‌صورت تابع جریمه در تابع هدف به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون محدودیت به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Find}: c_{d_1}, k_{d_1}, \ldots, c_{d_{Ntmd}}, k_{d_{Ntmd}} \qquad (۲۰)$$

$$\text{Minimize:} \qquad F(T) = \alpha\, X_{max} + \beta\, \max[0\,,\, g_1] \qquad (۲۱)$$

$$g_1 = \frac{X_{max_{TMD}}}{X_L} - 1 \qquad (۲۲)$$

مقادیر m_{d_i}، k_{d_i}، c_{d_i} از دامنه‌ی تعریف شده برای آنها انتخاب می‌شوند، بنابراین نیازی به اعمال محدودیت‌های مربوط به پارامترهای TMD به‌صورت تابع جریمه در مسئله‌ی بهینه‌سازی نیست.

α و β ضرایب تابع جریمه می‌باشند که باید به‌صورت مناسبی توسط طراح و براساس مشخصات مسئله‌ی مورد مطالعه انتخاب شوند [39].

الگوریتم ژنتیک (Genetic- Algorithm)

محدوده‌ی کاربرد الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع است و با پیشرفت روزافزون علوم و تکنولوژی، استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل گسترش می‌یابد. در الگوریتم ژنتیک، طی مرحله‌ی تولید مثل از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود که با تأثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب، برش و جهش معمولاً بیشترین کاربرد را در الگوریتم ژنتیک دارند. در این پژوهش برای حفظ بهترین جمعیت از فرآیند نخبه‌گرایی استفاده شده است که درصد کوچکی از جمعیت نسل بعد مستقیماً از جمعیت نسل قبل کپی می‌شود. در این مقاله از نمونه‌برداری تصادفی تک‌مرحله‌ای [40] برای عملگر انتخاب استفاده شده است که در آن احتمال انتخاب هر کروموزم برابر است با:

$$P(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} F(x_i)} \qquad (۲۳)$$

$P(x_i)$ احتمال انتخاب کروموزم i ام، $F(x_i)$ شایستگی کروموزم iام و N_{ind} تعداد کروموزم در هر جمعیت است. برای عملگر تولید مثل در این پژوهش، روش تولید مثل داخلی انتخاب شده است که نوزاد براساس ترکیب خطی دو کورموزوم والد با استفاده از معادلات زیر نوشته می‌شود:

$$O_{1,2} = P_1 + \alpha (P_2 - P_1) \qquad (۲٤)$$

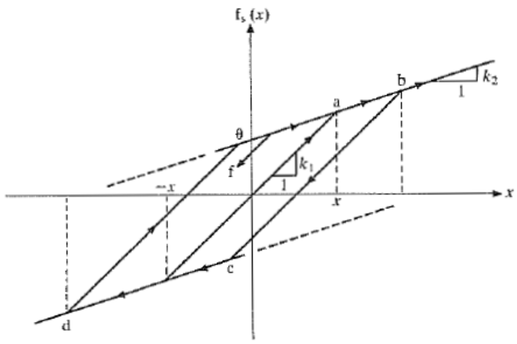
P_1 و P_2 متغییرهای کروموزم‌های والد، $O_{1,2}$ ژن‌های کروموزم نوزاد و α ضریب مقیاس است که به‌طور تصادفی و معمولاً در فاصله‌ی [-0.25, 1.25] برای تعیین هر متغیر کروموزم نوزاد انتخاب می‌شود [41]. اگر m_r، درصد جهش ژن‌ها و N_{var} و N_{new} به‌ترتیب نشانگر تعداد متغیرها و کروموزم‌های تولید شده باشند، در این حالت تعداد ژن‌هایی که دچار جهش می‌شوند از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$N_{Mutated} = m_r \times N_{var} \times N_{new} \qquad (۲۵)$$

مثال عددی

برای بررسی کارایی MTMD در کاهش پاسخ سازه‌ی

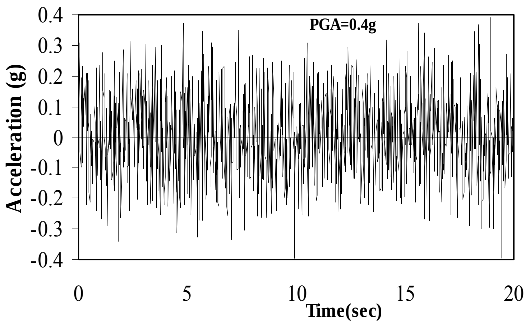
غیرخطی، قاب برشی ۸ طبقه با فرض رفتار هیسترسیس دو خطی مطابق شکل (۲) و با مشخصات یکسان برای همه‌ی طبقات شامل سختی الاستیک k_1 = 340400 kN/m ، سختی ثانویه k_2 = 34040 kN/m، جرم m= 345.6 ton، ضریب میرایی ویسکوز خطی c= 734.3 kN sec/m در نظرگرفته شده است. در تغییرمکان جانبی نسبی $Y_{yielding}$ = 2.4 cm تسلیم در طبقات اتفاق می‌افتد و فرکانس طبیعی سازه براساس سختی اولیه‌ی سازه برابر $f_{initial}$ = 0.92 HZ می‌باشد. در این پژوهش هدف طراحی و بررسی عملکرد MTMD بر روی سازه‌های غیرخطی بوده که به‌منظور سادگی آنالیزها و تمرکز روی موضوع اصلی مقاله سازه‌ی غیرخطی از نوع برشی انتخاب شده است. برای سازه‌های غیرخطی دیگر نظیر قاب‌های خمشی روش مورد استفاده در این مقاله به‌طور کامل قابل‌استفاده است و اختلاف فقط در ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه خواهد بود.



شکل ۲ منحنی هیسترسیس دوخطی

زلزله‌ی طراحی

در صورتی که طراحی MTMD برای یک زلزله‌ی خاص انجام شود ممکن است مکانیزم MTMD در مقابل زلزله‌های دیگر مؤثر نباشد. بنابراین برای این‌که پارامترهای بهینه‌ی به‌دست آمده برای TMDها، در زلزله‌های مختلف مؤثر باشند لذا تحریک پایه برای طراحی MTMD به‌صورت اغتشاش سفید در نظر گرفته شده است. در این مقاله سازه در مقابله‌ی تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید، $w_1(t)$، با بیشینه‌ی شتاب ارتعاش برابر PGA=0.4g، مطابق شکل (۳)، قرارگرفته و به طراحی بهینه‌ی MTMD پرداخته شده است. جدول (۱) پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی کنترل‌نشده را تحت ارتعاش $w_1(t)$ نشان می‌دهد. تحت اثر ارتعاش $w_1(t)$ طبقات ۱، ۲ و۳ دارای تغییرمکان جانبی نسبی بزرگ‌تر از $Y_{yielding}$ = 2.4 cm هستند و وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند.



شکل ۳ تاریخچه‌ی زمانی ارتعاش $w_1(t)$

جدول ۱ پاسخ سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌شده با MTMD به‌ازای μ=4% تحت ارتعاش $w_1(t)$

طبقه	ماکزیمم جابجایی کل سازه (cm)		ماکزیمم جابجایی نسبی سازه (cm)		ماکزیمم شتاب سازه (cm/sec^2)	
	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده
1	4.78	1.52	4.78	1.52	614.13	574.8
2	8.6	2.96	3.38	1.45	649.6	562.5
3	10.38	4.25	2.43	1.37	658.9	559.4
4	12.37	5.39	2.18	1.38	669.8	578.5
5	14.05	6.37	1.75	1.34	758.1	595.9
6	15.42	7.41	1.44	1.12	836.9	607.4
7	16.42	8.18	1.11	0.84	839.2	529
8	16.93	8.66	0.64	0.61	797.3	639.7

طراحی MTMD با N_{tmd} =5 و μ=4%

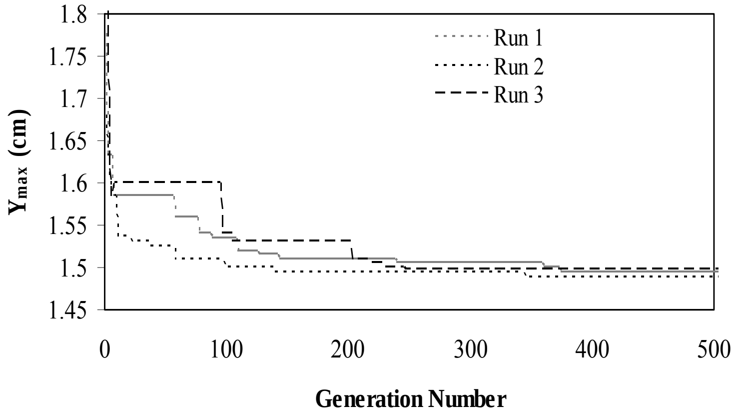
برای توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینه‌ی MTMD، سازه‌ی ۸ طبقه تحت ارتعاش $w_1(t)$ قرار گرفته است، در حالتی که پنج میراگرجرمی با درصد جرمی برابر μ=4%، در طبقه‌ی آخر به‌صورت موازی قرار گرفته است که μ برابر نسبت جرم MTMD به جرم کل سازه می‌باشد. در این حالت مسئله‌ی بهینه‌سازی ۱۰ متغیر دارد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک با پارامترهای زیر حل شده است.

0.05 = درصد جهش، 1.0= درصد احتمال برش، 1.0= شکاف نسل، 0.9= درصدجایگزینی، تعداد جمعیت برابر25، 500= تعداد کل نسل‌ها، مکانیزم برش: روش تولید مثل داخلی، مکانیزم انتخاب: روش نمونه‌برداری تصادفی تک مرحله‌ای. برای حل مسائل بهینه‌سازی از برنامه‌ی نوشته شده در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

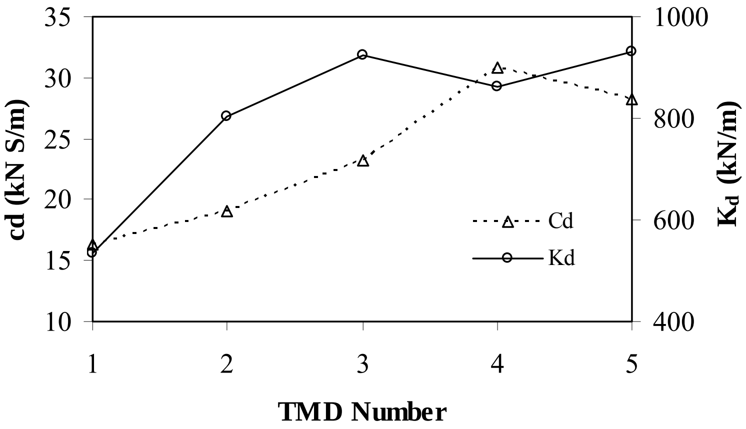
هم‌چنین حداکثر تغییرمکان جانبی TMDها برابر $X_L = 150$ cm در نظر گرفته شده است. اعمال محدودیت برای حداکثر تغییرمکان جانبی میراگرها، X_L، کارایی مکانیزم MTMD را تحت تأثیر قرار می‌دهد به‌طوری‌که افزایش مقدار این پارامتر تا یک مقدار مشخصی باعث بهبود عملکرد MTMD خواهد شد. در نمونه‌های عملی این مقدار براساس مشخصات کارخانه‌ی سازنده‌ی میراگر انتخاب می‌شود.

شکل(٤) نحوه ی همگرایی الگوریتم ژنتیک را برای سه بار حل مسئله نشان می‌دهد. از نتایج معلوم می‌شود که مقدار تابع هدف (جابه‌جایی جانبی نسبی سازه) با افزایش تعداد نسل کاهش یافته یا ثابت بوده است که این امر به خاطر حفظ بهترین جمعیت در هر نسل و انتقال به جمعیت بعدی است. هم‌چنین هر سه بار اجرا به جواب بهینه‌ی نهایی تقریباً یکسانی رسیده است.

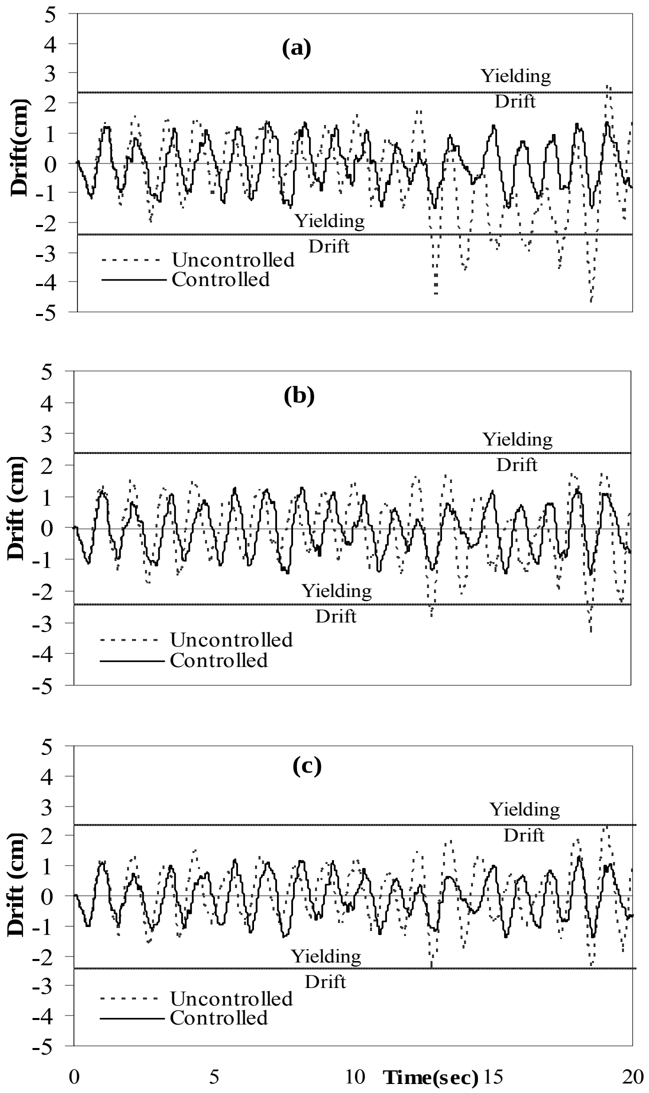
در شکل (۵) سختی و میرایی بهینه‌ی TMDها به‌ازای $\mu = 4\%$ تحت تحریک $w_1(t)$ نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که علی‌رغم یکسان بودن جرم TMDها، مقدار میرایی و سختی آنها دارای اختلاف قابل‌توجهی می‌باشند. جدول (۱) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌شده را به‌ازای μ=4% و N_{tmd} =5 تحت تحریک $w_1(t)$ نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل (٦) و (٧) به‌ترتیب تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان جانبی نسبی و منحنی هیسترسیس سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌شده برای طبقات اول، دوم و سوم آورده شده است.



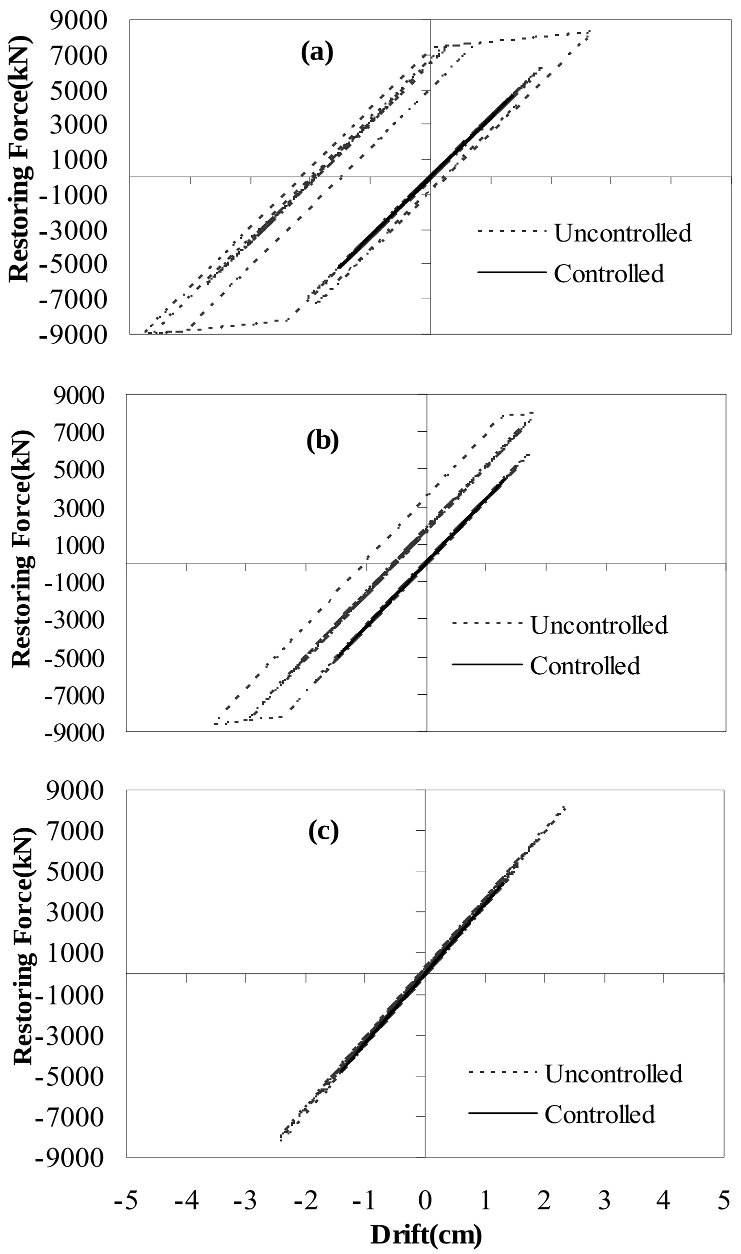
شکل ٤ همگرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف برای سه بار حل مسئله به‌ازای μ=4%



شکل ۵ (a) میرایی TMDها (b) سختی TMDها در حالت بهینه برای μ=4%



شکل ٦ تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌شده (a) طبقه‌ی اول، (b) طبقه‌ی دوم و (c) طبقه‌ی سوم



شکل ۷ منحنی هیسترسیس سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌نشده: (a) طبقه‌ی اول، (b) طبقه‌ی دوم، (c) طبقه‌ی سوم

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که ماکزیمم جابه‌جایی نسبی، ماکزیمم جابه‌جایی کل و ماکزیمم شتاب سازه در حالت کنترل شده به‌ترتیب حدود ٦٨، ٤٨ و٣٧ درصد کاهش داشته است. هم‌چنین معلوم می‌شود که با استفاده از MTMD سازه‌ی کنترل‌شده در ناحیه‌ی خطی نگه داشته شده است در حالی‌که سازه‌ی کنترل‌نشده در طبقات ۱، ۲ و ۳ دارای رفتار غیرخطی بوده است. از طرف دیگر علاوه بر کاهش بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی که تابع هدف مسئله بوده است بیشینه‌ی جابه‌جایی کل و شتاب هم کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند.

با دقت در شکل (۷) می‌توان گفت که حلقه‌های

هیسترسیس در سازه‌ی کنترل‌شده دارای کاهش قابل‌توجهی می‌باشند که این مسئله منجر به کاهش انرژی هیسترسیس انباشته شده و خرابی سازه می‌گردد.

تست MTMD بهینه شده تحت زلزله‌های غیرطرح

برای بررسی کارایی MTMD بهینه شده در مقابل زلزله‌های دیگر که متفاوت از زلزله‌ی طرح $w_1(t)$ است، سیستم سازه- MTMD طراحی شده در برابر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل قرار گرفته است. رکوردهای El-Centro (1940 ; PGA=0.34g) و Hachinohe (1968 ; PGA=0.23g) به‌عنوان زلزله‌های دورگسل و زلزله‌های Kobe (1995 ; PGA=0.83g) و Northridge (1994 ; PGA=0.84g) به‌عنوان زلزله‌های نزدیک‌گسل انتخاب گردیده‌اند که در جدول (۲) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌نشده در مقابل زلزله‌های تست نشان داده شده است.

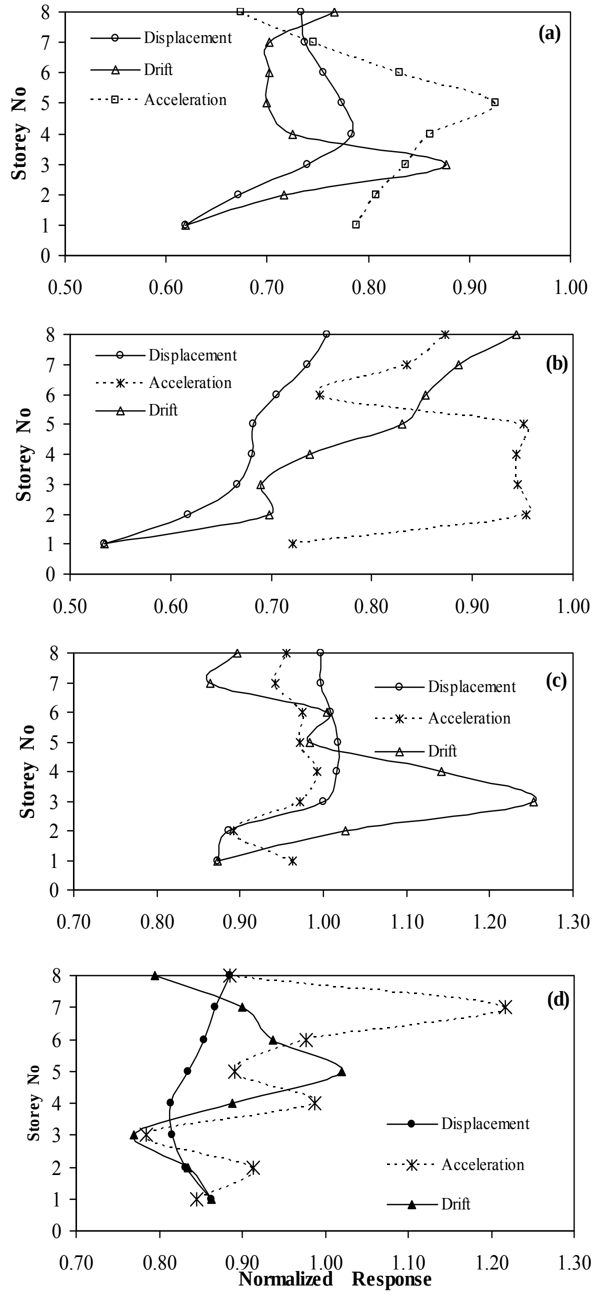
شکل (۸) پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده (یعنی نسبت پاسخ سازه‌ی کنترل‌شده به پاسخ همسان سازه‌ی کنترل‌نشده) را تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد. پاسخ نرمال شده بزرگ‌تر از ۱، بیانگر اثر منفی MTMD روی پاسخ مورد نظر در سازه است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی که مربوط به طبقه‌ی اول است و به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است، برای همه‌ی زلزله‌های تست (چه نزدیک‌گسل و چه دورگسل) کاهش داشته است در حالی‌که تغییرمکان جانبی نسبی در بعضی از طبقات تحت زلزله‌های نزدیک‌گسل افزایش داشته است. هم‌چنین سایر پاسخ‌های سازه مانند بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی کل و شتاب طبقات نیز کاهش داشته است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که کارایی MTMD برای زلزله‌های مختلف متفاوت می‌باشد به‌گونه‌ای که در مثال بررسی شده، بهترین کارکرد مربوط به تغییرمکان جانبی نسبی (Drift) تحت اثر زلزله‌ی Hachinohe بوده است.

با توجه به این‌که عملکرد MTMD وابسته به مشخصات زلزله‌ی ورودی می‌باشد، لذا در کاربردهای عملی برای دست‌یابی به عملکرد بهتر و مؤثرتر مکانیزم MTMD، بایستی در طراحیMTMD از رکورد زلزله‌ی مناسبی نظیر رکورد طراحی منطقه یا ترکیبی از زلزله‌های متناسب با شرایط لرزه‌خیزی منطقه طبق آیین‌نامه‌های زلزله استفاده نمود.

جدول ۲ ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌نشده در مقابل زلزله‌های تست

تحریک	ماکزیمم جابجایی کل (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی (cm)	ماکزیمم شتاب (cm/s^2)
Hachinohe	15.95	3.82	899
El-Centro	17.72	4.26	1010
Northridge	29.97	12.42	1523
Kobe	30.08	9.95	1997



شکل ۸ پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده با μ =4% تحت زلزله‌های تست (a) El-Centro (b) Hachinohe (c) Northridge (d) Kobe

بررسی اثر جرم و تعداد TMD بر کارایی MTMD

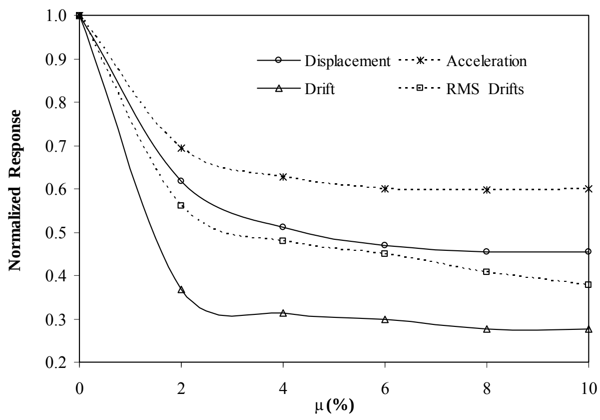
برای بررسی اثر درصد جرمی میراگرها بر کارکرد MTMDدر کاهش پاسخ‌های سازه‌ی غیرخطی، مشابه روش توضیح داده شده در بخش قبل، برای درصدهای جرمی مختلف در حالتی که پنج TMD در طبقه‌ی آخر و به‌صورت موازی قرار گرفته است با فرض $X_L = 150$ cm به طراحی بهینه‌ی MTMD بر روی سازه‌ی ۸ طبقه‌ی غیرخطی پرداخته شده است. شکل (۹) پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده را برای مقادیر مختلف درصد جرمی تحت ارتعاش $w_1(t)$ نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که (۱)

عموماً افزایش درصد جرمی MTMD باعث کاهش بیشتر پاسخ‌های سازه شده است که این مسئله بیانگر افزایش کارایی MTMD با افزایش درصد جرمی است، (۲) برای درصدهای جرمی مختلف باتوجه به این‌که تابع هدف کمینه کردن بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی بوده است ولی مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی کل و شتاب هم با افزایش درصد جرمی، بیشتر کاهش می‌یابد، (۳) با توجه به نتایج می‌توان گفت که حساسیت کارایی MTMD به درصد جرمی، در مقادیر کمتر μ بیشتر می‌باشد. نتیجه‌گیری (۱) تا (۳) مشابه نتایج حاصل از کاربرد MTMD بر روی سازه‌های با رفتار خطی می‌باشد [34]، (٤) در دامنه‌ی مورد بررسی برای μ (٪۲تا٪۱۰) سازه‌ی کنترل‌شده در ناحیه‌ی خطی باقی مانده است در حالی‌که سازه‌ی کنترل‌نشده در طبقات ۳،۲،۱ دارای رفتار غیرخطی بوده است. در شکل(۱۰) پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده برای درصدهای جرمی مختلف برای MTMD، تحت اثر زلزله‌های تست نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد که کارایی MTMD با افزایش درصد جرمی بهبود می‌یابد که میزان کاهش پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف درصد جرمی، وابسته به مشخصات زلزله ورودی است. در بین زلزله های تست، کاراییMTMD در کاهش تابع هدف در برابر زلزله‌های دورگسل عموماً بهتر بوده است. هم‌چنین افزایش درصد جرمی باعث می‌شود سازه‌ی غیرخطی در مقابل زلزله‌های تست در ناحیه‌ی خطی باقی بماند. به‌عنوان مثال پنج طبقه‌ی پایین سازه‌ی کنترل‌نشده در مقابل زلزله‌ی El-Centro وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند که در حالت کنترل‌شده با $\mu = 2\%$ فقط دو طبقه‌ی پایین وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند و با افزایش درصد جرمی به $\mu = 8\%$ کلیه‌ی طبقات در ناحیه‌ی خطی باقی می‌ماند.

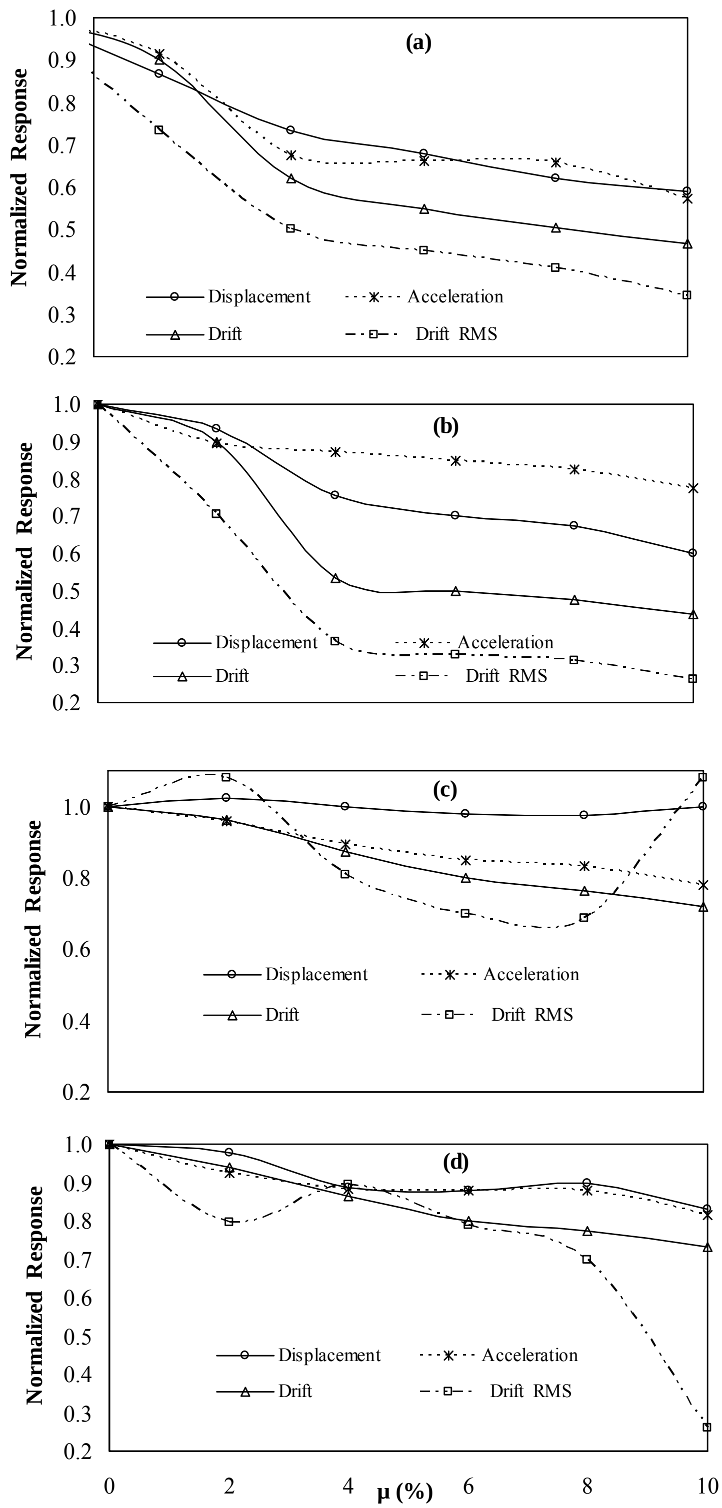
برای بررسی اثر تعداد TMDها در عملکرد MTMD، برای تعداد مختلف TMDها در حالتی که در طبقه‌ی آخر سازه و به‌صورت موازی قرار گرفته باشند، برای درصدهای جرمی مختلف مکانیزم سازه- MTMD تحت اثر زلزله‌ی $w_1(t)$ قرار گرفته و به طراحی بهینه‌ی MTMD پرداخته شده است.

در شکل (۱۱) بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده برای تعداد مختلف TMD و درصدهای جرمی متفاوت نشان داده شده است.

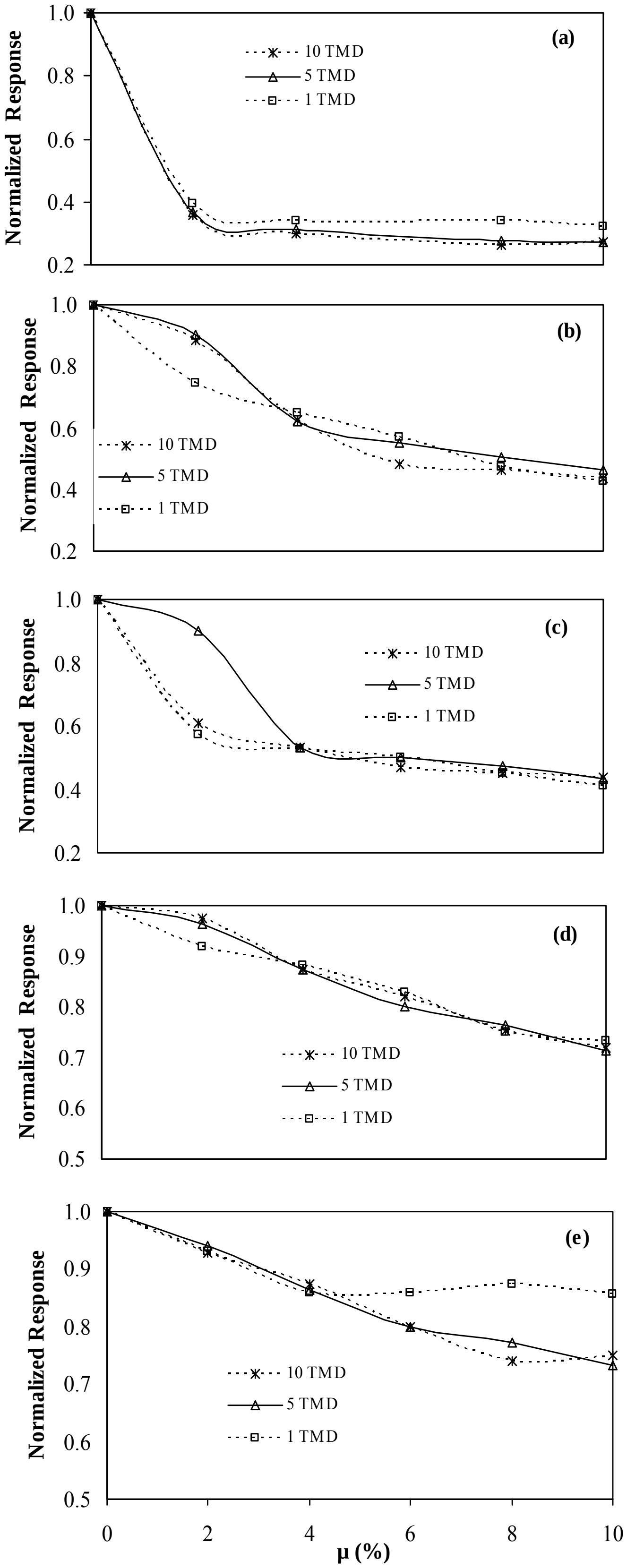
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در این مطالعه با فرض جرم یکسان برای TMDها و قرارگیری به‌صورت موازی در طبقه‌ی آخر، با افزایش تعداد میراگرهای جرمی، تغییر چشم‌گیری در کارایی MTMD نسبت به TMD منفرد تحت ارتعاش طراحی و زلزله‌های تست مشاهده نمی‌شود. این نتیجه‌گیری با نتایج حاصل از کاربرد MTMD بر روی سازه‌های با رفتار خطی مطابقت دارد [31, 42].



شکل ۹ پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده با درصد جرم‌های مختلف برای MTMD تحت ارتعاش $w_1(t)$



شکل ۱۰ پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده با درصد جرم‌های مختلف برای MTMD تحت ارتعاش زلزله‌های تست
Kobe (d) Northridge (c) Hachinohe (b) El-Centro (a)



شکل۱۱ بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی نرمال شده‌ی سازه کنترل شده برای تعداد مختلف TMD تحت ارتعاش زلزله‌های مختلف (a) $w_1(t)$ (b) El-Centro (c) Hachinohe (d) Northridge (e) Kobe

بررسی تغییر مکان جانبی MTMD ها

در طراحی بهینه‌ی MTMD، تغییرمکان ماکزیمم TMD ها به‌صورت محدودیت در مسئله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که حداکثر تغییرمکان TMDها بایستی از X_L=150cm کمتر باشد. ماکزیمم جابه‌جایی TMDها به‌ازای درصد جرم‌های مختلف در حالت نصب یک TMD و پنج TMD در جداول (۳) و (٤) آورده شده است.

با توجه به نتایج جداول (۳) و (٤) می‌توان گفت که در مثال مورد بررسی در حالت نصب یک TMD و پنج TMD مقدار انتخاب شده برای حداکثر تغییرمکان جانبی TMDها زیادتر از مقدار لازم است و با کاهش مقدار آن تا حد X_L=100cm کارایی MTMD تغییری نمی‌کند. مقدار ماکزیمم برای X_L براساس مشخصات ساخت TMDها انتخاب می‌شود و در مواردی ممکن است که کارایی این مکانیزم را محدود کند [43].

جدول ۳ ماکزیمم تغییرمکان جانبی TMDها برحسب سانتی‌متردر حالت نصب یک TMD

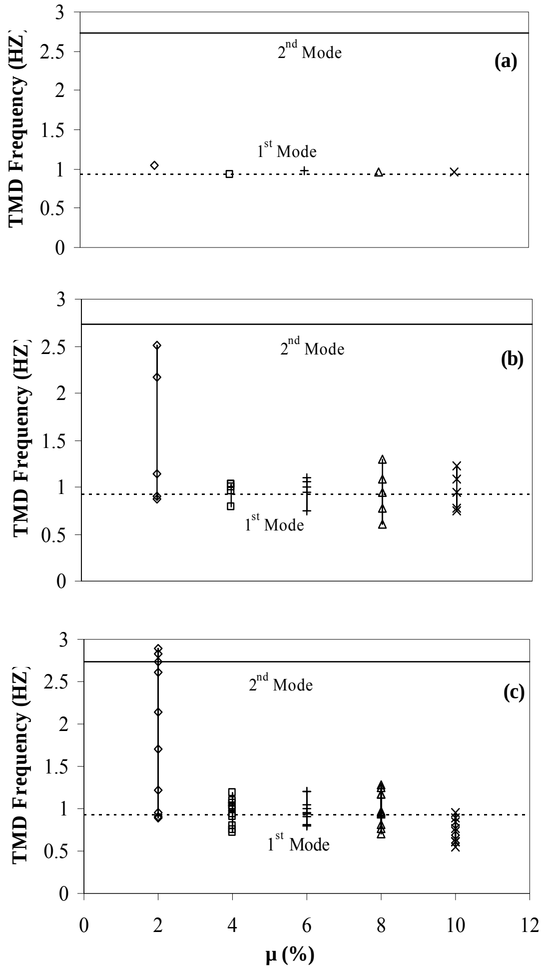
TMD	μ=2%	μ=4%	μ=8%	μ=10%
1	42.5	23	22	19.5

جدول ٤ ماکزیمم تغییرمکان جانبی TMDها بر حسب سانتی‌متر در حالت نصب پنج TMD

TMD	μ=2%	μ=4%	μ=8%	μ=10%
1	12.5	33.5	36.8	28
2	12.4	34	29	34
3	17.6	31.5	29	28
4	30.4	27	31	27
5	100	28	16	26

فرکانس TMDهای بهینه

فرکانس TMDهای بهینه به‌ازای درصد جرم و تعداد مختلف TMD و هم‌چنین فرکانس مود اول و دوم سازه که براساس سختی اولیه‌ی سازه‌ی غیرخطی محاسبه شده است در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۲ فرکانس TMDها به‌ازای درصد جرم‌های مختلف در حالت: (a) N_{tmd} =1، (b) N_{tmd} =5، (c) N_{tmd} =10

مقایسه‌ی فرکانس TMDها با فرکانس مود اول و دوم سازه نشان می‌دهد که در اکثر موارد (به‌ازای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد میراگرهای جرمی) فرکانس TMDها در مقایسه با فرکانس مودهای مختلف سازه، نزدیک‌تر به فرکانس مود اول سازه می‌باشد گرچه در برخی از موارد به فرکانس مود دوم سازه هم نزدیک‌تر شده است. این نتیجه‌گیری در طراحی MTMD برای سازه‌ی غیرخطی که به‌خاطر تغییر سختی، فرکانس ارتعاشی در حال تغییر می‌باشد قابل‌توجه می‌باشد که مشابه سازه‌های خطی، اکثرTMDها تمایل به هماهنگی با فرکانس مود اول سازه که براساس سختی اولیه‌ی سازه محاسبه شده است، دارند. بنابراین می‌توان گفت که در طراحی

MTMD بهینه برای سازه‌های غیرخطی، با تقریب خوبی می توان TMDها را در دامنه‌ی فرکانسی نزدیک به مود اول سازه (با فرض سختی اولیه) توزیع نمود گرچه جزئیات کامل‌تر در رابطه با این نتیجه‌گیری نیاز به مطالعات عددی بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کارایی مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه (MTMD) در کاهش پاسخ سازه‌های با رفتار غیرخطی پرداخته شده است. برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای MTMD از روشی مبتنی بر تعریف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن ماکزیمم تغییرمکان جانبی نسبی سازه استفاده شده است که از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسئله استفاده کرده است. برای توضیح روش پیشنهادی، یک سازه‌ی ۸ طبقه با رفتار غیرخطی هیسترسیس و از نوع قاب برشی تحت اثر اغتشاش سفید قرار گرفته است و ضمن طراحی میراگر جرمی چندگانه، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند درصد جرم MTMD، تعداد TMDها و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بر کارکرد این مکانیزم بررسی شده است. براساس تحلیل‌های عددی می‌توان به نتایج زیراشاره کرد:

۱- با توجه به این‌که برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی روش مشخصی ارائه نشده است بنابراین الگوریتم مورد استفاده در این مقاله برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی روش مناسب و کارا به لحاظ سادگی و دقت می‌باشد.

۲- نتایج نشان می‌دهد در صورت طراحی بهینه‌ی MTMD می‌توان پاسخ سازه‌ی غیرخطی و در نتیجه خرابی سازه را تا حد زیادی تحت زلزله‌ی مشخص کاهش داد به‌طوری‌که در مثال مورد بررسی برای درصد جرمی‌های مختلف امکان حفظ رفتار سازه در ناحیه‌ی خطی بوده است.

۳- مشابه سازه‌های با رفتار خطی، کارایی MTMD با افزایش درصد جرمی عموماً افزایش می‌یابد. مثلاً ماکزیمم جابه‌جایی نسبی سازه‌ی کنترل‌شده تحت تحریک زلزله‌ی El-Centro به‌ازای درصد جرمی‌های $\mu = 2\%$، $\mu = 4\%$ و $\mu = 8\%$ به‌ترتیب 9.8، 38 و 49.5 درصد کاهش داشته است.

٤- بررسی کارایی MTMD در کاهش پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل نشان می‌دهد که کارایی این مکانیزم در کاهش پاسخ سازه، وابسته به محتوای فرکانسی زلزله و میزان غیرخطی شدن سازه می‌باشد. مثلاً برای درصد جرمی یکسان $\mu = 4\%$ بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی سازه تحت زلزله‌ی El-Centro و Northridge به‌ترتیب 38 و 13 درصد کاهش داشته است.

٥- نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد MTMD علاوه برکاهش بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نسبی سازه که به‌عنوان معیار خرابی سازه‌ی غیرخطی در طراحی بهینه‌ی این مکانیزم استفاده شده، سایر پاسخ‌های سازه را نیز کاهش داده است. مثلاً جابه‌جایی کل و شتاب سازه‌ی کنترل‌شده با $\mu = 4\%$ تحت تحریک زلزله El-Centro به‌ترتیب 27 و 33 درصد کاهش داشته است

٦- در این مطالعه با فرض توزیع یکسان جرم برای میراگرهای جرمی و قرارگیری موازی آنها در طبقه‌ی آخر برای طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD برای تعداد مختلف TMD شامل (۱، ۵ و ۱۰) نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد TMD تأثیر چشم‌گیری در افزایش کارایی MTMD در مقایسه با TMD منفرد ندارد که این نتیجه‌گیری مشابه سازه‌های خطی می‌باشد.

۷- بررسی فرکانس میراگرهای جرمی در حالت بهینه نشان می‌دهد که علی‌رغم تغییر سختی و فرکانس ارتعاش سازه‌ی غیرخطی، در اکثر موارد (به‌ازای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد میراگرهای جرمی) فرکانس TMDها در دامنه‌ای نزدیک به فرکانس مود اول سازه (با فرض سختی اولیه)

توزیع شده‌اند که این نتیجه‌گیری می‌تواند به‌عنوان روش مفید تقریبی برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

1. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos , A.G., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F. and Yao., J., "Structural control: past, present and future", *Journal of Engineering Mechanics,* ASCE, 123(9), pp. 897-966, (1997).
2. Soong, T. and Dargush, G.F., "Passive energy dissipation systems in structural engineering", John Wiley & Sons, Chichester, (1997).
3. Frahm, H., "Device for damping vibrations of bodies", US Patent, (1909).
4. Bishop, R. E. D and Welbourn, D. B., "The Problem of the dynamic vibration absorber", Engineering, Lond, (1952).
5. Falcon, K. C., Stone, B. J., Simcock, W. D and Andrew, C., "Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping", *Journal of Mechanical Engineering Science,* 9, pp. 374-381, (1967).
6. Kaynia, A.B., Veneziano, D., Biggs, J.M., "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", *Journal of Structural Division ASCE,* 107(8), pp. 1465-1484, (1981).
7. Bernal, R., "Influence of ground motion characteristics on the effectiveness of tuned mass dampers", *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering,* Acapulco, Mexico, (1996).
8. Mohebbi, M. and Joghataie, A., "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", Structural Design of Tall and Special Buildings, 21(1), pp. 57-76, (2012).
9. Hong, N. and Waranitchai, P., "Design of multiple tund mass dampers by using numerical optimizer", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 34, pp. 125-144, (2005).
10. Chen, G. and Wu, J., "Optimal Placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures", *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 127(9), pp. 1054-1062, (2001).
11. Balendra,T., Wang, C. M. and Yan, N., "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper", Engineering Structure, 23, pp. 1054-1067, (2001).
12. Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control", *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 129(7), pp. 845-856, (2003).
13. Joghataie, A. and Mohebbi, M., "Optimal controller of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms", Structural Design of Tall and Special Buildings, 21, pp. 77-95,(2012).
14. Bani-Hani, K. A., "Vibration control of wind-induced response of tall buildings with an active tuned mass damper using neural networks", *Journal of Structural Control and Health Monitoring,* 14(1),

pp. 83 – 108, (2007).

15. Shariatmadar, H., Golnargesi, S. and Akbarzadeh Totonchi, M.R. "Vibration control of buildings using ATMD against earthquake excitations through interval type-2 fuzzy logic controller", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing),* 15, pp.321-338, (2014).

۱۶. محبی، م. و شاکری ، ک.، " استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی جرم میراگر فعال در سازه‌های غیرخطی"، مجله‌ی علمی- پژوهشی سازه و فولاد، شماره‌ی دوازدهم، (۱۳۹۱).

17. Ankireddi S. and Yang, H.T.Y., "Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads", *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 122, pp. 83– 91, (1996).

18. Yan, N., Wang, C.M. and Balendra, T., "Optimum damper characteristics of ATMD for buildings under wind loads", *Journal of Structural Engineering,* ASCE; 125, pp. 1376 –1383, (1999).

19. Nagashima, I., "Optimal displacement feedback control law for active tuned mass damper", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30(8), pp. 1221–1242, (2001).

20. Li, C., Jinhua, Li.,J. and Qu, Y.,"An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures", Mechanical Systems and Signal Processing, 24, pp. 746–765, (2010).

21. Lin, P.Y., Chung, L.L. and Loh, C.H.; "Semi-active control of building structures with semi-active tuned mass damper", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 20(1), pp. 35–51, (2005).

22. Karamodin ,A., Haji Kazemi,H., Rowhanimanesh,A. and Akbarzadeh Totonchi, M.R. , "Semi-active control of structures using a neuro-inverse model of MR dampers" , Scientia Iranica ,16, pp. 256-263,(2009).

23. Karamodin, A., Haji Kazemi, H. "Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for MR dampers", Structural Control and Health Monitoring, 278, pp. 1002-1020,(2008).

24. Xu, K. and Igusa T., "Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 21(12), pp. 1059–1070, (1992).

25. Li, C., "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29, pp. 1405-1421, (2000).

26. Kareem, A, and Klein, S., "Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings", *Journal of Structural Engineering,* ASCE, 121(2), pp. 348-361, (1995).

27. Yamaguchi, H and.Harnpornchai, N., "Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillation", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 22, pp. 51-62, (1993).

28. Igusa, T. and Xu, K., "Vibration control using multiple tuned mass damper", *Journal of Sound and Vibration,* 175, pp. 491-503 (1994).

29. Jangid, R.S., "Optimum multiple tuned mass dampers for base excited undamped systems",

Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28, pp. 1041-1049, (1999).

30. Li., C., "Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31, pp. 897-919, (2002).
31. Zuo, L. and Nayfeh, S.A., "Optimization of the individual stiffness and damping parameters in multiple-tuned-mass-damper systems", *Journal of Vibration and Acoustics,* Transactions of ASME, 127, pp. 77-83, (2005).
32. Carneiro, R.B., Avila, S.M. and De Brito, J.L.V., "Parametric study on multiple tuned mass dampers using interconnected masses", *International Journal of Structural Stability and Dynamics,* 8(1), pp. 187-202, (2008).
33. Moon, K.S., "Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance and preliminary design", Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, pp. 347-366, (2010).
34. Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour Y. and Majzub,H., "Designing optimal multiple tuned mass dampers using Genetic Algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures", *Journal of Vibration and Control,* 19(4), pp. 605-625,(2013).
35. Li, C. and Yanxia, L., "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 1041–1052, (2002).
36. Li, C. and Liu, Y., "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp.1041–1052, (2002).
37. Li, C. and Bilei, Zhu. "Investigation of response of systems with active multiple tuned mass dampers", Structural Control and Health Monitoring, 14, pp. 1138-1154, (2007).
38. Li, C., Li., J., Yu, Z. and Qu., Y. "Performance and parametric study of active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures under ground acceleration", *Journal of Mechanics of Materials and Structures,* 4(3), pp. 571-588, (2009).
39. Bathe K.J.,"Finite Element Procedures", Prentice-Hall, Inc.: New Jersey, USA, (1996).
40. Joghataie, A. and Mohebbi, M., "Vibration controller for confined masonry walls by distributed genetic algorithms", *Journal of Structural Engineering, ASCE,* 134(2), pp. 300-309, (2008).
41. Mühlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D., "Predictive models for the breeder genetic algorithm: I. Continuous parameter optimization", Evolutionary Computation, 1(1), pp. 25-49, (1993).
42. Baker, J.E., "Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm", Proc. ICGA 2, pp. 14-21, (1987).
43. Li, C. and Liu, Y., "Further characteristics for multiple tuned mass dampers", *ASCE Journal of Structural Engineering 128(10),* pp. 1362- 1365, (2002).
44. Lin, C. C., Wang, J. F., Lien, C.H., Chiang, H.W. and Lin, C.S., "Optimum design and experimental study of multiple tuned mass dampers with limited stroke", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39, pp. 1631–1651, (2010).